

УДК 625.282:625.032.07

**Л.В. ОВЕРЬЯНОВА**, асп. НТУ «ХПИ»

## **ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИГОРОДНОГО СООБЩЕНИЯ**

Рассматривается инерционный накопитель энергии на основе кольцевого маховика, который совмещен с электрической машиной с преобразователем мостового типа на IGBT -транзисторах. Предложен подход относительно выбора основных параметров.

Розглядається інерційний накопичувач енергії на основі кільцевого маховика, який суміщений з електричною машиною з перетворювачем мостового типу на IGBT -транзисторах. Запропоновано підхід щодо вибору основних параметрів.

The inertial energy storage flywheel based ring which is combined with an electric car with DC converter or bridge-type IGBT - transistors is considered. An approach to the selection of key parameters is proposed.

### **Введение**

В области энергосбережения электрифицированных железных дорог лучшим по массогабаритным показателям и по степени согласованности процессов, протекающих в системе «тяговая сеть – подвижной состав», по нашему мнению, является применение инерционных электромеханических накопителей энергии (ИЭМНЭ).

Существует ряд примеров использования накопителей такого типа как в системе тягового электроснабжения – железная дорога Кейхан [1], метрополитен Гамбурга [2], концептуальный проект для Харьковского метрополитена [3], так и непосредственно на подвижном составе – дизель-поезд Lirex [4].

Следует отметить, что с точки зрения рационального использования пространства на подвижном составе, когда габариты, отводимые под накопительный комплекс, весьма ограничены, целесообразным является выполнение маховика совмещенным с электрической машиной: при такой конструкции ротор наряду со своим функциональным назначением в электромеханическом процессе выполняет роль аккумулятора кинетической энергии.

### **Конструкция электромеханического преобразователя**

В качестве аккумулятора принят кольцевой маховик, совмещенный с ротором электрической машины [5]. На внутренней поверхности маховика размещаются высококоэрцитивные постоянные магниты, которые бандажируются композитным высокопрочным материалом. Коаксиально

ротору располагается статор, насаженный на вал. На неподвижном статоре располагается обмотка. Вся конструкция помещается в вакуумный кожух.

Накопитель функционирует как совокупность электромеханического преобразования энергии и системы управления. Для системы электромеханического преобразования энергии предлагается электрическая машина с преобразователем мостового типа, который реализован на IGBT-транзисторах. Индуктор представляет магнитную систему, полюса которой образованы постоянными магнитами. Обмотка якоря состоит из отдельных секций – катушек, шаг которых равен полусумме делению  $\tau$ . Катушки, соединяясь последовательно, образуют  $n$  фаз. Фазы смещаются по окружности статора относительно друг друга с шагом  $\tau/n$  и каждая фаза включается в нагрузку однофазных инверторов тока, которые, в свою очередь, соединены последовательно.

### Подход к выбору основных параметров ИЭМНЭ

При проектировании ИЭМНЭ, который будет функционировать в системе «тяговая сеть – подвижной состав», следует определить зоны его работы и разделить их во времени.

Возможны три режима работы: накопление (рис. 1) – накопитель получает энергию от тяговых двигателей, работающих в режиме электродинамического торможения; выдача энергии в систему тягового привода – накопитель отдает энергию тяговым двигателям в режиме тяги; режим хранения энергии – тяговые двигатели получают питание только от контактной сети, при этом накопитель не обменивается энергией с тяговыми двигателями.

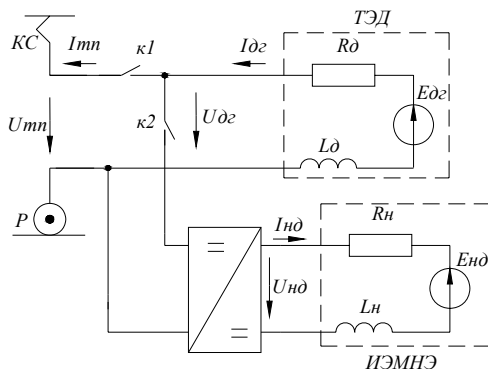


Рисунок 1 – Блок-схема тягового привода в режиме накопления ИЭМНЭ:

$КС$  – контактная сеть,  $P$  – рельс,  $ТЭД$  – тяговой электродвигатель постоянного тока,  $ИЭМНЭ$  – инерционный электромеханический накопитель энергии,  $Пр$  – двуправленный DC-DC преобразователь,  $\kappa1, \kappa2$  – разьединители,  $L_\delta, R_\delta$  – индуктивное и активное сопротивления в цепи ТЭД,  $L_n, R_n$  – индуктивное и активное сопротивления в цепи ИЭМНЭ,  $e_{\deltaг}, e_{нд}$  – ЭДС ТЭД и ИЭМНЭ соответственно,  $i_{mn}, u_{mn}, i_{\deltaг}, u_{\deltaг}, i_{нд}, u_{нд}$  – ток и напряжение тяговой сети, ТЭД и ИЭМНЭ соответственно.

При выборе основных параметров накопителя считаем целесообразным пренебречь режимом хранения энергии и зонами совместной работы ИЭМНЭ с тяговой сетью и руководствоваться лишь режимом накопления на этапе остановочного торможения ЭПС. Для приведенной на рис. 1 блок-схемы тягового привода в двигательном режиме работы ИЭМНЭ может быть записана следующая система алгебро-дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{di_{\partial z}}{dt} = \frac{e_{\partial z} - u_{\partial z} - i_{\partial z} \cdot R_{\partial}}{L_{\partial}}, \\ \frac{dV_n}{dt} = \frac{i_{\partial z} \cdot e_{\partial z}}{30 \cdot m_n \cdot V_n} \left( \frac{C_{м\partial}}{C_{e\partial}} \right) \cdot \pi \cdot \eta_{пер}, \\ \frac{di_{н\partial}}{dt} = \frac{u_{н\partial} - e_{н\partial} - i_{н\partial} \cdot R_n}{L_n}, \\ \frac{d\omega_{н\partial}}{dt} = \frac{i_{н\partial} \cdot e_{н\partial}}{30 \cdot J_n \cdot \omega_{н\partial}} \left( \frac{C_{мн}}{C_{ен}} \right) \cdot \pi, \\ u_{\partial z} \cdot i_{\partial z} \cdot \eta_{пер} = u_{н\partial} \cdot i_{н\partial} \end{cases} \quad (1)$$

с функциями связи

$$\begin{aligned} e_{\partial z} &= f(C_{e\partial}, \Phi_{\partial z}, V_n); \\ e_{н\partial} &= f(C_{ен}, \omega_{н\partial}); \\ i_{н\partial} &= f(u_{\partial z}, i_{\partial z}, \beta), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $V_n$  – скорость подвижного состава,  $m_n$  – масса подвижного состава,  $C_{м\partial}$ ,  $C_{e\partial}$  – машинные постоянные ТЭД,  $\eta_{пер}$  – коэффициент полезного действия тракта передачи мощности,  $\omega_{н\partial}$  – угловая скорость маховика,  $J$  – момент инерции маховика ИЭМНЭ,  $C_{мн}$ ,  $C_{ен}$  – постоянные электрической машины ИЭМНЭ,  $\Phi_{\partial z}$  – магнитный поток ТЭД,  $\beta$  – коэффициент DC-DC преобразователя, определяющий отношение выходного напряжения  $u_{н\partial}$  к входному  $u_{\partial z}$  в текущий момент времени.

Активное сопротивление  $R_n$  и индуктивность обмотки якоря  $L_n$  ИЭМНЭ могут быть определены из выражения

$$R_n = \frac{1.78 \cdot 10^{-8} K_f N_{kc} w^2 2(l_a + \tau)}{K_{sa}^2}, \quad (3)$$

$$L_n = N_{kc} (L_{ka} - M_{12} w^2), \quad (4)$$

где  $K_{sa}$  – размер поперечного сечения катушки якоря,  $w$  – количество витков в катушке,  $N_{ks}$  – число катушек в обмотке якоря,  $l_a$  – активная длина якоря,  $\tau$  – полюсное деление,  $L_{ka}$  – индуктивность катушки обмотки якоря,  $M_{12}$  – взаимная индуктивность двух смежных катушек якоря, принадлежащих разным фазам.

Параметры  $K_{sa}$ ,  $L_{ka}$ ,  $M_{12}$  могут быть найдены следующим образом

$$K_{sa} = \sqrt{\frac{\tau \cdot G}{2(\tau + l_a)}}, \quad (5)$$

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ \tau \cdot \ln \left( \frac{\Delta_1}{\Delta_3} \cdot \frac{\Delta_3 + \sqrt{\Delta_3^2 + 4l_a^2}}{\Delta_1 + \sqrt{\Delta_1^2 + 4l_a^2}} \right) \right\} + \frac{\tau}{2} \ln \left( \frac{\Delta_1 \cdot \Delta_3}{\Delta_2^2} \cdot \frac{\left( \Delta_2 + \sqrt{\Delta_2^2 + 4l_a^2} \right)^2}{\left( \Delta_1 + \sqrt{\Delta_1^2 + 4l_a^2} \right) \left( \Delta_3 + \sqrt{\Delta_3^2 + 4l_a^2} \right)} \right) +$$

$$+ l_a \cdot \ln \left( \frac{\left( 2l_a + \sqrt{\Delta_2^2 + 4l_a^2} \right)^2}{\left( 2l_a + \sqrt{\Delta_1^2 + 4l_a^2} \right) \left( 2l_a + \sqrt{\Delta_3^2 + 4l_a^2} \right)} \right) + \sqrt{\Delta_1^2 + 4l_a^2} - \Delta_1 + 2\Delta_2 + \Delta_3 -$$

$$- 2\sqrt{\Delta_2^2 + 4l_a^2} + \sqrt{\Delta_3^2 + 4l_a^2} [6]; \quad (6)$$

$$L_{ka} = \frac{\mu_0}{\pi} w^2 (\tau + l_a) \left[ \ln \frac{2l_a}{K_{sa}} - \frac{l_a}{\tau + l_a} \ln l_a + \sqrt{\tau^2 + l_a^2} \right] - \frac{\tau}{\tau + l_a} \ln (\tau + \sqrt{\tau^2 + l_a^2}) + \frac{2\sqrt{\tau^2 + l_a^2}}{\tau + l_a} - \frac{1}{2} + 0,447 \frac{K_{sa}}{\tau + l_a}, \quad (7)$$

где  $G$  – расход активного материала на обмотку якоря,

$$\Delta_1 = \tau + l_a; \quad \Delta_2 = \tau; \quad \Delta_3 = \tau - 2l_a, \quad (8)$$

Для такого электромеханического преобразователя, ротор которого вращается с угловой скоростью  $\omega_n$ , ЭДС и вращающий момент равны

$$e_n = C_{en} B_{cp} \omega_n, \quad (9)$$

$$M_n = C_{mn} B_{cp} i_n \quad (10)$$

Здесь  $C_e$  и  $C_m$  – машинные постоянные, которые определяются согласно выражениям:

$$C_{en} = 2N_{kc} w l_a \frac{\tau \cdot p}{\pi}, \quad C_{mn} = N_{kc} w l_a D_a, \quad (11)$$

где  $B_{cp}$  – среднее значение индукции в воздушном зазоре,  $p$  – число пар полюсов,  $D_a$  – диаметр якоря.

Энергия обмена, габаритные размеры маховика и электрической машины устанавливаются исходя из энергии, отдаваемой тяговым двигателем в процессе остановочного торможения:

$$W_n = W_{m0} \cdot \eta_{nep}, \quad (12)$$

$$W_n = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot m_{y0} \cdot R_{np}^2 \cdot h \cdot V_{np}^2 \cdot \left( 1 - \frac{R_{вн}^4}{R_{np}^4} \right), \quad (13)$$

где  $W_n$  – энергия обмена ИЭМНЭ,  $W_{m0}$  – энергия торможения ЭПС,  $m_{y0}$  – удельная масса маховика с конструктивными элементами,  $R_{np}$  – наружный радиус маховика,  $h$  – высота маховика,  $V_{np}$  – линейная скорость маховика на внешней точке,  $R_{вн}$  – внутренний радиус маховика.

Приведенная модель позволяет анализировать влияние геометрических и электрофизических параметров системы электромеханического преобразования энергии накопителя на его энергетические показатели.

### Тестовая задача

Опираясь на вышеизложенные положения, произведем выбор основных параметров ИЭМНЭ. В качестве исходных данных для тестовой задачи примем величину энергии, которая высвобождается при электродинамическом торможении двухвагонной секции электропоезда ЭР2Р массой 117 т от скорости 80 км/ч до 0 км/ч на горизонтальном участке пути. Эта величина соответствует энергии обмена проектируемой накопительной системы. В расчёте на один тяговый двигатель она составляет 6,3 МДж. Принимая во внимание тот факт, что ИЭМНЭ разряжается до определенного порогового значения, характеризующего энергией "мертвого объема", выбор основных параметров следует производить с учетом этого порогового значения.

Для аккумуляирования и последующей выдачи энергии принимаем ИЭМНЭ с полной энергией 6,32 МДж (при этом принято, что энергия "мертвого объема" составляет величину 0,02 МДж). ИЭМНЭ с такими параметрами способен воспринимать электроэнергию средним током 400 А при напряжении 700 В на протяжении 40 с.

Определяемые параметры накопителя разделим на две группы: первая – характеризующая запасаемую энергию вращающихся масс, вторая – систему электромеханического преобразования энергии.

Исходя из монтажного объема, отводимого под накопительную систему, принимаем следующие геометрические размеры маховика: внешний радиус ротора – 0,225 м, внутренний радиус – 0,11 м, высота – 0,335 м. Усредненная удельная масса материала ротора равна  $2700 \text{ кг/м}^3$ . При этом для запасаения энергии в 6,32 МДж согласно выражению (13) линейная скорость ротора на внешней точке будет составлять 430 м/с. Этому соответствует частота вращения ротора ИЭМНЭ, равная 18260 об/мин.

Исходя из геометрических размеров маховика и его скорости вращения могут быть предложены следующие геометрические размеры и параметры электрической машины: диаметр статора – 0,21 м, число пар полюсов индуктора – 2, полюсное деление – 0,165 м, активная длина якоря – 0,243 м, число фаз – 6, число катушек в фазе – 4, число витков в катушке – 2, номинальный размер эффективного медного прямоугольного провода без изоляции –  $5,1 \times 11,6 \text{ мм}$ . Систему возбуждения образуют постоянные магниты Nb-Fe-B с коэрцитивной силой по индукции 979000 А/м. Длина магнита – 0,115 м, ширина – 0,205 м, толщина – 0,015 м. Воздушный зазор – 0,005 м.

В программной среде FEMM для принятой геометрии электрической машины были выполнены расчёты её магнитного поля (рис.2а) и получено распределение индукции в воздушном зазоре при холостом ходе (рис.2б) и номинальной нагрузке с током 400 А (рис. 2в). Среднее значение индукции в воздушном зазоре в режиме нагрузки составило 0,15 Тл, что достаточно для обеспечения заданного напряжения, равного 700 В.

Таким образом, в ходе решения тестовой задачи были определены основные геометрические и электрофизические параметры ИЭМНЭ мощностью 300 кВт, который может обеспечить энергию обмена в 6,3 МДж.

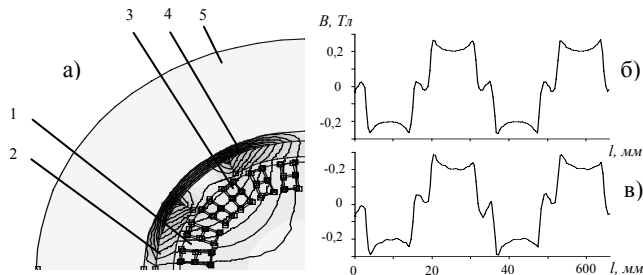


Рисунок 2 – Расчет магнитного поля электрической машины (а), распределении индукции в воздушном зазоре при холостом ходе (б) и при номинальной нагрузке (в): 1 – статор; 2 – постоянный магнит; 3 – катушка статора; 4 – экранирующее стальное кольцо; 5 – маховик.

## Выводы

Применение инерционного электромеханического накопителя энергии является перспективной технологией энергосбережения. Предложен подход к выбору его основных геометрических и электрофизических параметров для обмена энергией в тяговом приводе электрического подвижного состава. Решена тестовая задача, по результатам которой установлено, что инерционный электромеханический преобразователь с приведенными параметрами может обеспечить энергию обмена в 6,3 МДж.

Следует отметить, что важным требованием при функционировании такой системы является необходимость обеспечить управляемый переток мощности между тяговым электродвигателем и инерционным накопителем энергии при встречно меняющихся оборотах упомянутых электромеханических устройств в генераторном и двигательном режимах их работы. Удовлетворить это требование возможно применением реверсивного buck & boost DC-DC – преобразователя, позволяющего в заданном диапазоне, контролируемо изменять напряжение на входе и выходе накопителя и тягового электродвигателя.

**Список литературы:** 1. Maruyama, N. Stabilisierung der Fahrleitungsspannung mittels Schwungrad. [Text] / N. Maruyama // Elektrische Bahnen. – 1992(90). – №4. P.125–129. 2. Стационарные накопители энергии на метрополитене Гамбурга [Текст] // Железные дороги мира. – 2010. – № 7. – С. 60–64. 3. Омеляненко, В. И. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения. [Текст] / В. И. Омеляненко, Г.В. Омеляненко // Техническая электродинамика. – 2002. – №4. – С.83–88. 4. Дизель-поезд Lirix [Текст] // Железные дороги мира. – 2001. – № 2. – С. 35– 42. 5. Омеляненко, В.И. Электромеханический преобразователь энергии инерционного накопителя для сетей тягового электроснабжения. [Текст] / В.И. Омеляненко, Г.В. Омеляненко. // Электромеханика. – 2001. – №4-5. – С.67–74. 6. Kratki, N. Ausgleichsvorgänge und Schwingungen beim elektrodynamischen Magnetkissen-System-[Text] / N. Kratki, K. Oberrefl // Archiv für Elektrotechnik. - 1975. - Band 57. - Heft 2 - p.59-64.

Поступила в редколлегию 09.04.2012